

Investigaciones Recientes

ESTUDIO ISOTOPICO DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO ABAUCAN (Catamarca, Argentina)

JACQUES MOLINARI
JEAN-CHARLES FONTES
GREGORIO B. BARÓ
HÉCTOR R. GÓMEZ

Planteo del problema

Este estudio se refiere a la cuenca superior del río Abaucán y a las dos subcuencas que lo alimentan: la del río Chaschuil o Guanchin y la del río Aguas Negras o Fiambalá, todos ellos en el extremo oeste de la provincia de Catamarca, Dep. de Tinogasta.

Estos valles, cuyos cursos inferiores solamente están poblados y cultivados, drenan lo esencial de los recursos acuíferos de una región seca y desértica.

La modestidad de los aportes y la importancia de las necesidades han conducido al Superior Gobierno de la provincia de Catamarca y al Consejo Federal de Inversiones a solicitar el concurso de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) para inventariar mejor los recursos acuíferos.

Teniendo en cuenta que, salvo en el caso de crecidas excepcionales, los cursos del río Abaucán y sus dos tributarios presentan importantes soluciones de continuidad, parecería interesante, en efecto, recurrir en este sitio a las técnicas isotópicas para tratar de apreciar la importancia de los tránsitos subterráneos y la amplitud de los recursos susceptibles de ocupar los depósitos aluviales interesados por dichos tránsitos.

El estudio emprendido por la CNEA con la asistencia de la OEA y del CEA sobre el manto aluvial de Fiambalá, tiene como objetivo primario, discernir los problemas planteados por las autoridades competentes, pero también tiene

como finalidad llamar la atención de otros usuarios potenciales sobre la importancia de una metodología en pleno desarrollo.

Además, ya que este estudio presenta un carácter exploratorio debido a la ausencia casi total de informaciones isotópicas sobre la región y a la indigencia de los archivos hidrometeorológicos en la zona estudiada, parecía interesante examinar el alcance de una campaña de reconocimiento efectuada en este contexto difícil, a breve plazo y con medios limitados.

Nos hemos esforzado por exponer aquí los elementos que hemos recogido, recordando el principio de las técnicas utilizadas y dando, a través de este ejemplo concreto, una idea del tipo de investigaciones que podrían ser desarrolladas en la mayor parte de las cuencas hidrográficas andinas.

Descripción e informaciones disponibles sobre las subcuencas

Límites geográficos de la cuenca

Los límites geográficos de la región son los siguientes: Norte: Cordillera de San Buenaventura (26° 50'), con altitudes de más de 5.000 m. Sur: Valle del río Abaucán a la altura de Tinogasta (28° 10'). Este: Cadena de la Sierra de Zapata y Culampayo (67° 30') con altitudes del orden de más de 4.000 m. Oeste: Cordillera de los Andes (límite con Chile) con altitudes del orden de 6.000 m y en ciertos casos mayores (cima de Incahuasi : 6.620 m, cima del Nacimiento: 6.493 m).

Las dos subcuencas superiores Guanchin o Chaschuil y Fiambalá o Aguas Negras están separadas por la cadena Norte-Sur de las Planchadas, que culmina en el Ojo de San Antonio a 4.600 m (fig. 1).

Jacques Molinari: Commissariat à l'Energie Atomique Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, France.
Jean Charles Fontes: Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Gregorio B. Baró y Héctor R. Gómez: Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico, Ezeiza, Argentina.

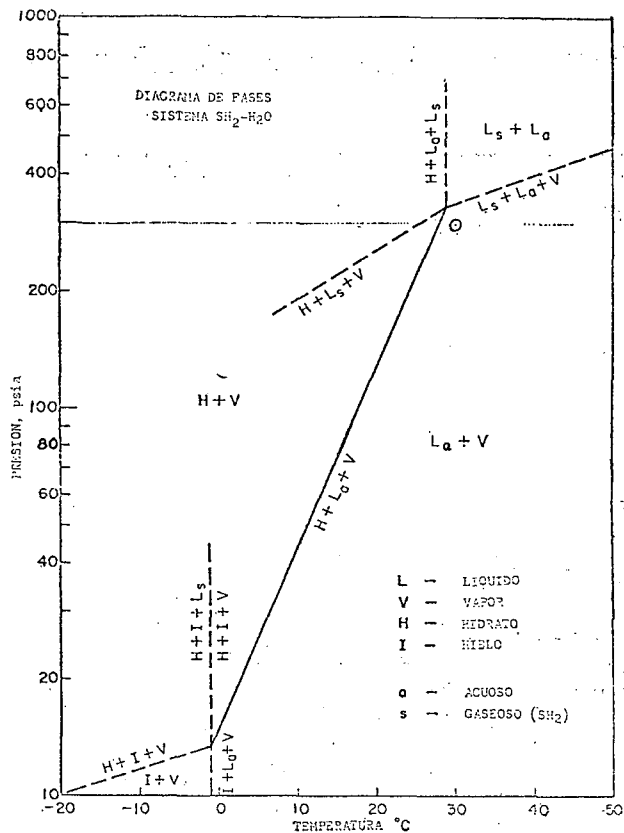


FIGURA 1

ticos o de control para los procesos de fabricación de agua pesada.

Conclusiones

El campo que hemos llamado fisicoquímica del agua pesada y que hemos intentado delimitar en este artículo, comprende el estudio de numerosos y variados temas y su importancia está probada en el desarrollo de los métodos de fabricación que ya

han alcanzado la etapa industrial, así como en las constantes mejoras que se introducen en los mismos. La necesidad, de reducir costos de fabricación, dar acceso a otras materias primas, aumentar la disponibilidad de productos, etcétera, impone el estudio de nuevos procesos de obtención o la optimización de los existentes, con lo cual la importancia actual y futura de este campo se acrecienta.

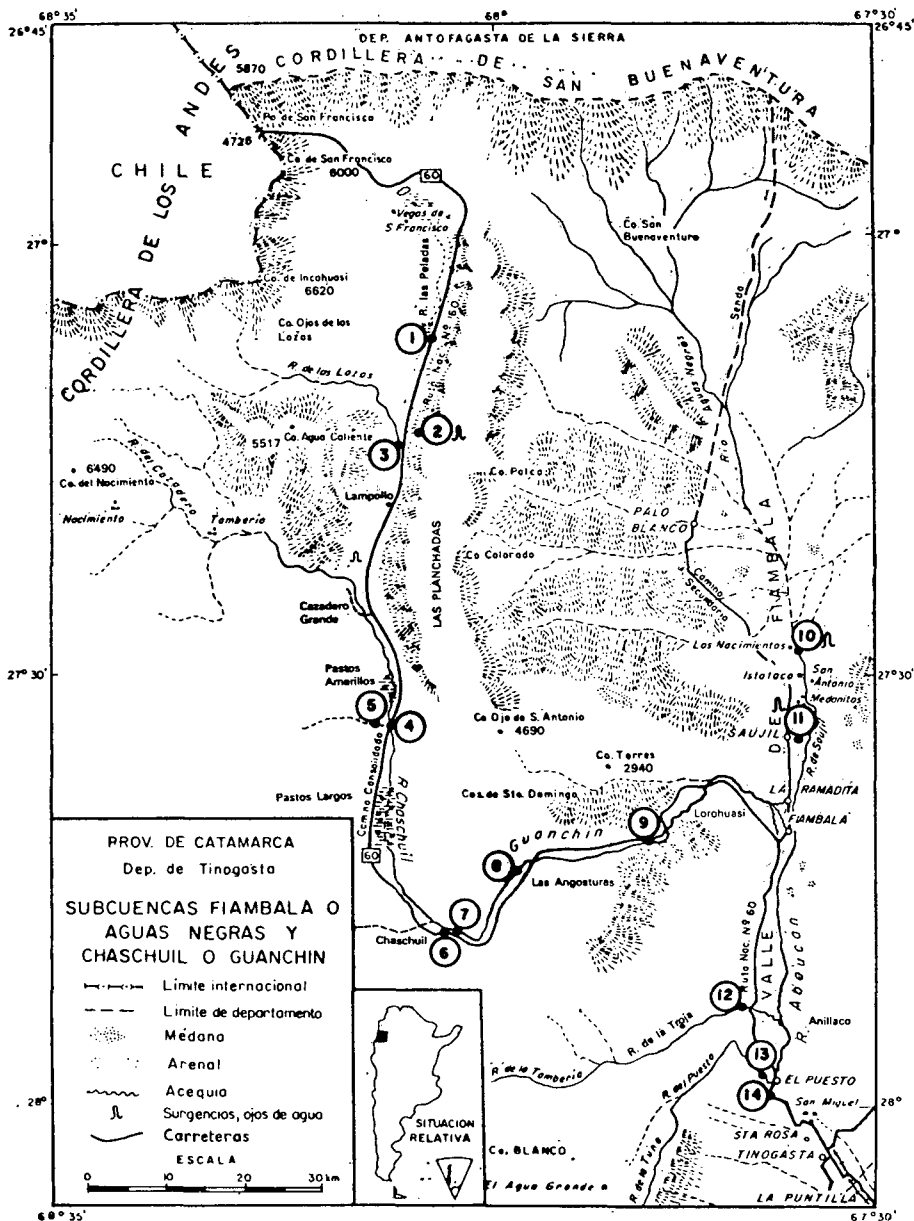


FIGURA 1: Límites geográficos de la Cuenca (Ver Nota 1); puntos de muestreo:

	Altura	Distancia a Fiambalá
a) Subcuenca Chaschuil o Guanchin		
1. Conchesta de nieve (nieve acumulada por el viento)	4.000 m	165 km
2. Aguada del Médano - resurgencias	3.800 m	148 km
3. Río de Las Lozas	3.750 m	147 km
4. Vado de Las Cortaderas (río Chaschuil)	3.350 m	103 km
5. Vado de Las Cortaderas (aportes margen der.)	3.350 m	103 km
6. Resurgencias de Chaschuil	3.100 m	70 km
7. Pantanos de Chaschuil	3.100 m	70 km
8. Río Guanchin, Lan Angosturas, Bailon	2.650 m	48 km
9. Río Guanchin, Vado de Lorohuasi	2.100 m	27 km
b) Subcuenca Fiambalá		
10. Nacimientos de Istataco, resurgencias	1.750 m	45 km
11. Pozo artesiano de Saujil	1.650 m	16 km
c) Subcuenca Abaucán		Distancia a Buenos Aires
12. Río de La Troya en Batungasta	1.650 m	1.350 km
13. Resurgencias captadas (foggara) en El Puesto	1.280 m	1.339 km
14. Río Abaucán, El Puesto. Lugar conocido por la Toma	1.250 m	1.335 km

HIDROGRAFÍA

a) *Subcuenca Chaschuil o Guanchín*

En la parte más septentrional de la cuenca (Vegas de San Francisco) nace el río de las Peladas que se pierde rápidamente en otros bañados. Más al Sur, sus presuntas surgencias (Nacimientos del Médano) se reúnen sobre la margen derecha del río Las Lozas. Al Norte, en el lugar conocido por Lampollo, estas aguas se pierden en nuevos pantanos (bañados). El escurrimiento aparece en superficie, aproximadamente 20 km aguas abajo, con el aporte, en la margen izquierda del río Cazadero, en el lugar conocido por Cazadero Grande, para no interrumpirse más, excepto a nivel de los bañados de Pastos Largos, situados aproximadamente a mitad de camino del vado de las Cortaderas y de Chaschuil.

No es hasta Chaschuil, al nivel de las resurgencias de igual nombre, que las aguas del río, que ha tomado el nombre de Chaschuil o Guanchín, siguen definitivamente un curso superficial. Se notará, sin embargo, que el caudal medio anual de este río, que es de 1.500 l/seg a una veintena de kilómetros de Fiambalá, según los datos confrontados por la Dirección Provincial de Aguas de Catamarca, no es de más de 500 l/seg al nivel de las tomas de agua que alimentan los canales de irrigación de esta aglomeración, infiltrándose la diferencia en las zonas aluviales de la confluencia de este río con el río Fiambalá.

b) *Subcuenca Fiambalá o Aguas Negras*

Los diferentes brazos que forman el río tienen su nacimiento al pie de la Cordillera de San Buenaventura, en una zona muy árida. El trazado de la red hidrográfica del curso superior no está bien definido y varía considerablemente durante el año. Esta disposición de la cuenca da lugar a infiltraciones importantes presumiblemente restituidas más adelante. La zona de manantiales está al pie de una terraza aluvial al norte de Istataco. Estas aguas que forman el río Fiambalá son utilizadas para la irrigación de viñedos en los alrededores de las localidades escalonadas entre Istataco y Fiambalá.

Con algunos aportes relativamente débiles en Saujil, el río Fiambalá confluye con el río Chaschuil o Guanchín para dar nacimiento al río Abaucán.

c) *Subcuenca Abaucán*

Las aguas de las dos subcuencas precedentes se pierden en las proximidades de Fiambalá, en extensiones arenosas y de dunas. Las aguas reaparecen a 30 km aproximadamente más al sur, cerca de Anillaco, en la confluencia del río de la Troya.

Los gastos medios mensuales en la estación de Tinogasta, que contabiliza la totalidad de las salidas en superficie de las cuencas han sido indicadas en la figura 2.

REFERENCIAS HIDROMETEOROLÓGICAS

El mapa geográfico IV 30(1) menciona diferentes estaciones meteorológicas. No obstante aquí solamente han sido publicados los datos registrados en la estación de Tinogasta, en el extremo sur de la cuenca estudiada. La interpretación de las observaciones sistemáticas(2) precisa que el río Abaucán sería de origen pluvionival y que la altura de precipitación anual sería del orden de 160 mm. Las precipitaciones más intensas corresponden a los meses de verano (cf. mapa 6 en (2)).

BREVE DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

Sobre la base de los documentos disponibles (3, 4) y de nuestras propias observaciones, la geología de las cuencas aparece relativamente simple. En su mayor parte están implantadas en zonas de depósitos clásticos recientes. Se trata de restos de abrasión de los relieves, en su mayoría constituidos por guijarros y bloques de areniscas de conglomerados asociados a elementos de filitas, de lavas, y de material cristalino o metamórfico. El conjunto, en general bastante grosero y removible, presenta una buena porosidad. A ciertos niveles existen lentes arcillosos de alteración que determinan pantallas discontinuas o provocan el estancamiento superficial. Sobre este complejo aluvional, las direcciones de las redes de superficie aparecen, no obstante, adaptadas a los accidentes del subestrado metamórfico.

HIDROQUÍMICA

a) *Resultado de los análisis preliminares realizados en la cuenca*

Una serie de análisis químicos de los constituyentes principales (índices geoquímicos y diagramas de Schoeller) están disponibles para las aguas de las subcuencas Guanchín y Aguas Negras(5).

Las principales conclusiones de este estudio pueden resumirse: 1) estrecha correlación entre las composiciones de las aguas de infiltración y las aguas de manantiales en las dos subcuencas; 2) diferencias notables de naturaleza química entre las aguas de cada subcuenca; 3) posibilidad de contactos prolongados entre el agua y los horizontes acuíferos.

La situación particular de estos sistemas endorreicos en las regiones con fuerte evaporación, donde las acumulaciones de sales solubles son importantes y están atestiguadas por la presencia de salinas, incita, sin embargo, a la pruden-

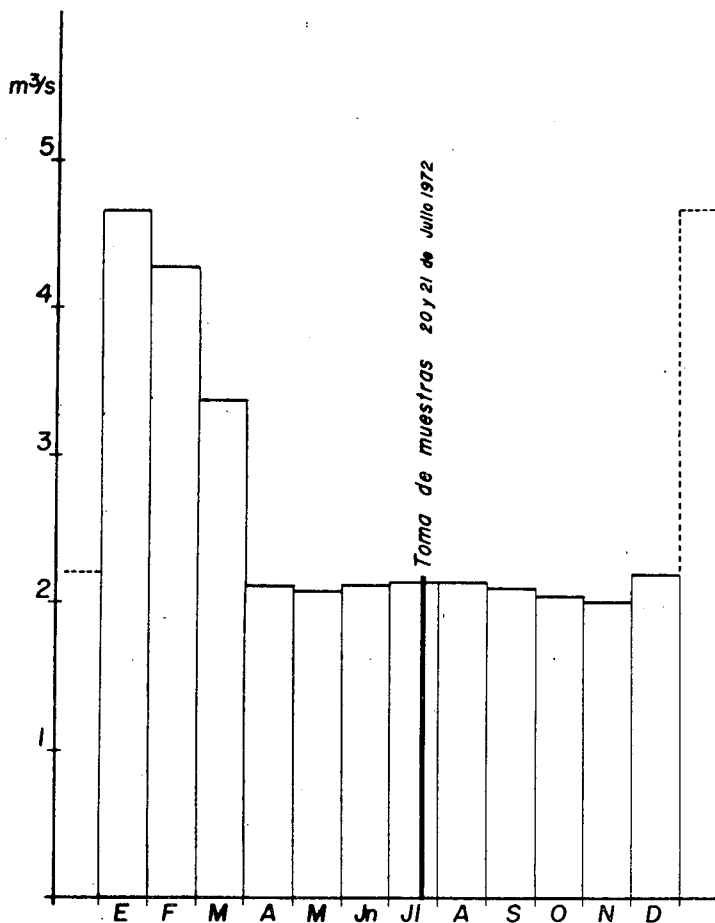


FIGURA 2: Gastos medios mensuales del río Abaucán en Tinogasta (ref. 2).

cia para toda interpretación de los valores elevados de los índices geoquímicos como representativos de tiempos de tránsito importantes.

b) Resultados de los análisis realizados en el marco del presente estudio

Los resultados de los nuevos análisis efectuados esta vez en período de estiaje, no permiten distinguir las aguas de las dos subcuencas, que son todas de tipo cloruro-bicarbonatadas (cf. fig. 3).

Informaciones suministradas por los isótopos ambientales seleccionados

CRITERIOS DE SELECCIÓN

En lo que concierne a la selección de los métodos de investigación, se puede encontrar en (6) el conjunto de técnicas isotópicas utilizables en hidrología.

Las dimensiones de la zona de estudio (la distancia entre zonas de infiltración y zonas de

resurgencias es del orden de una o varias decenas de km), el débil gradiente hidráulico, la gran potencia probable de las capas aluvionales permeables, el gran ancho de los acuíferos (algunos kilómetros), que hace presumir tiempos de tránsito considerables, permitían excluir *a priori* el empleo de trazadores artificiales.

Por esta misma razón, a la cual se agrega el contraste climático y meteorológico marcado de esta región andina, se podía prever en cambio, que un estudio con los isótopos ambientales aportaría informaciones sobre la hidrología de la región.

MEDICIONES DE LAS CONCENTRACIONES ISOTÓPICAS DE DEUTERIO (^2H) Y OXÍGENO 18 (^{18}O)

Las variaciones de los contenidos naturales de isótopos estables de los elementos ligeros (oxígeno, hidrógeno y también carbono, azufre y nitrógeno) son generalmente transcritos con la ayuda de la notación delta (δ), que expresa

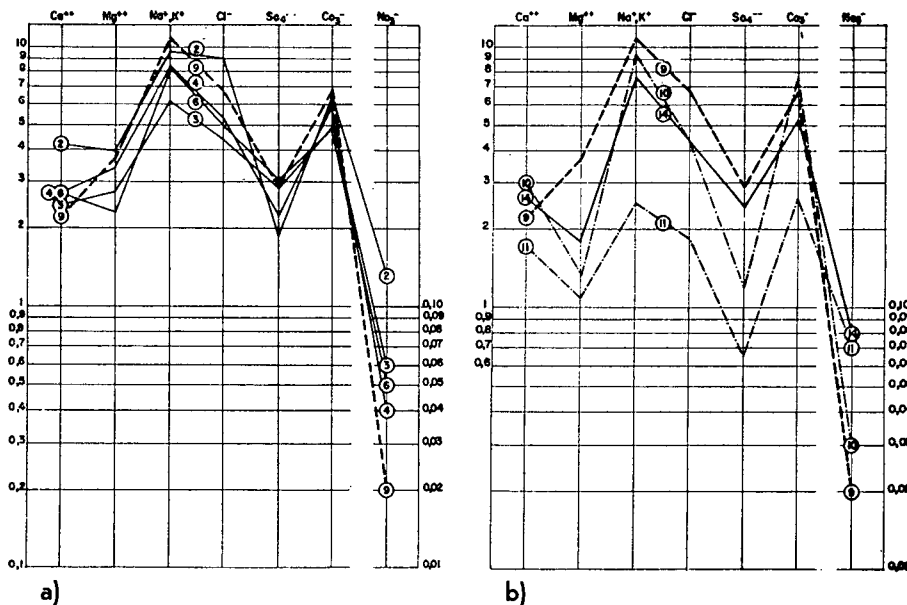


FIGURA 3: Análisis químico de los constituyentes principales (diagramas de Schoeller-Berkhoff) a) de las aguas de la subcuenca de Chaschuil o Guanchín, y b) de las aguas representativas de las tres subcuencas.

partes de diferencias relativas, en por mil, entre la muestra y un patrón de referencia:

$$\delta = [(R \text{ muestra}/R \text{ patrón}) - 1] \cdot 1.000$$

donde $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ o ${}^2\text{H}/{}^1\text{H}$

En el caso de las aguas, el patrón es el SMOW (Standard Mean Oceanic Water).

Se sabe que las variaciones de concentración de isótopos pesados (deuterio y oxígeno 18) resultan de los fraccionamientos isotópicos provocados por los cambios de fase (condensación y evaporación) ocurridos durante el transcurso de los ciclos hidrometeorológicos⁽⁶⁾. Así, en el seno de las precipitaciones se observan importantes variaciones del contenido de isótopos pesados en función de la fracción condensada, es decir, como primera aproximación, de la temperatura. Las concentraciones de isótopos pesados, deuterio y oxígeno 18, disminuye así (o correlativamente los contenidos de isótopos ligeros aumentan) con la altitud de recolección de las precipitaciones.

Por la misma razón, en un mismo lugar, las fluctuaciones de temperatura con las estaciones, se acompañan de variaciones de los contenidos isotópicos, estando las precipitaciones invernales enriquecidas en isótopos ligeros.

Los fenómenos que rigen las variaciones de concentración son de la misma naturaleza para el deuterio y el oxígeno 18 y concluyen en va-

riaciones proporcionales de concentraciones de estos dos isótopos. En un diagrama (${}^{18}\text{O}$; ${}^2\text{H}$) que indique los contenidos de oxígeno 18 en función de los contenidos de deuterio, las variaciones están representadas por rectas proporcionales de concentraciones de estos dos isótopos.

Sin embargo, los puntos representativos de los contenidos respectivos de ${}^{18}\text{O}$ y ${}^2\text{H}$ se alinean sobre rectas diferentes, de acuerdo a que las aguas hayan estado sometidas o no a una evaporación fuerte⁽¹⁰⁾. Los fenómenos de condensación que dan lugar a precipitaciones, corresponden a una familia de rectas de pendiente cercana a ocho, mientras que la evaporación está caracterizada por rectas de pendientes variables, pero inferiores a ocho.

Los contrastes orográficos importantes, marcados por diferencias de altitudes de cerca de 5.000 m en cada subcuenca, con interposición de cadenas montañosas sobre el trayecto de las masas de aire húmedo, permitían proveer variaciones considerables del contenido de isótopos pesados y por lo tanto, un buen trazado natural en las precipitaciones.

Además, los fenómenos de evaporación susceptibles de manifestarse al nivel de las zonas de estancamiento de los "desaguaderos", dejaban esperar enriquecimientos relativos en deuterio

y oxígeno 18 que determinarían desviaciones sensibles con respecto a la correlación "oxígeno 18/deuterio" de las aguas de precipitación⁽⁵⁾.

TRITIO (^3H)

Los contenidos de este radioisótopo, emisor β son expresados en U.T. (Unidad de tritio), que designan concentraciones relativas ($1 \text{ UT} = 10^{-18} \text{ } ^3\text{H}/^1\text{H}$).

El doble origen, natural y termonuclear, de este radioisótopo que marca las masas de vapor atmosférico, permite frecuentemente atribuir una edad relativa a las aguas subterráneas, referente a la época de las precipitaciones, distinguiéndose:

— aguas con una edad de más de 30 a 50 años sin tritio detectable

— aguas pretermonucleares anteriores a 1952

— aguas posteriores a 1952 que contienen un exceso de tritio termonuclear.

Bien entendido, estas subdivisiones presentan un carácter arbitrario ya que no tienen en cuenta el resultado de las mezclas posibles entre aguas de diferentes edades.

Además, la débil contaminación por el tritio nuclear de las masas atmosféricas del hemisferio sur no permite utilizar con la misma facilidad que en el hemisferio norte, la "señal" termonuclear característica de las aguas posteriores a 1952.

Sin embargo, los ensayos termonucleares efectuados recientemente en el Pacífico eran susceptibles de dar lugar a un aumento significativo del contenido de tritio en el hemisferio sur. Por otra parte, la latitud del sector estudiado está cercana a la zona privilegiada de inyección, correspondiente a las discontinuidades de la tropopausa. En estas condiciones, se podía presumir que, debido a la orografía de la región, la cual podía provocar la condensación, de masas de vapor enriquecidas en tritio durante su ascensión en las zonas más ricas en tritio de la tropopausa, esta señal alcanzaría aquí umbrales sensibles en la parte superior de las dos subcuencas.

Principios y objetivos

En la referencia⁽⁴⁾ se describen las técnicas relacionadas con el muestreo y la recolección de datos hidrometeorológicos utilizados en este trabajo.

El objetivo de este artículo consistía en obtener un inventario instantáneo de las concentraciones de trazadores naturales en un cierto número de sitios de la cuenca, en las condiciones hidrometeorológicas más favorables pa-

ra una generalización de las conclusiones. Hemos decidido intervenir en el período invernal (julio 1972), por las razones siguientes:

a) en julio el río Abaucán se encuentra en estiaje, es decir, en una época en que la influencia relativa de los mantos freáticos es máxima.

b) al otoño de 1972, que fue muy seco, lo siguió un período frío al principio del invierno, caracterizado por importantes nevadas.

Parecía posible, pues, en estas condiciones, proceder a realizar un muestreo bastante representativo de la gama más amplia de variaciones de los contenidos de isótopos estables de las aguas de la región y disponer, con la nieve, de una referencia sin sospechas de mezcla, en lo concerniente a los contenidos actuales de tritio.

La brevedad del plazo de que disponíamos, la importancia de las distancias a recorrer, la ausencia de documentos topográficos de calidad, así como el rigor de las condiciones climáticas, afectaron el muestreo. Por ello, en el valle de Chaschuil sólo pudo tomarse una muestra de nieve y ninguna muestra de agua de altitud superior a 3.800 m. No nos fue posible tampoco recolectar las aguas de todos los manantiales señalados sobre el fondo topográfico impreciso del único mapa de que disponíamos (en escala 1/500.000).

Discusión de los resultados de la medición de los isótopos estables

En un diagrama ^2H - ^{18}O (cf. fig. 4 y detalles fig. 5) han sido señalados los puntos representativos, así como la recta representativa de la correlación general de las aguas meteóricas a la escala del globo:

$\delta \text{ } ^2\text{H} = 8 \delta \text{ } ^{18}\text{O} + 10$, definida por Craig⁽⁵⁾.

a) Lluvias

A pesar de ciertas tendencias que permitirían suponer la posición de ciertos puntos (muestras 5, 11 y, menos netamente, 3) por encima de la recta con ordenada $+10$ en el origen, el número restringido de mediciones no permite poner en evidencia con certidumbre, la existencia de un exceso de deuterio $\Delta = \delta \text{ } ^2\text{H} - 8 \delta \text{ } ^{18}\text{O}$ superior a 10, como ha sido observado en las precipitaciones en la estación de Buenos Aires de la red A.I.E.A.-OMM y evaluado a 13,6‰⁽⁹⁾; exceso de deuterio que sugeriría el origen atlántico de las precipitaciones. No obstante, teniendo en cuenta que nuestros muestreos se referían solamente a las aguas superficiales, es siempre posible que estas aguas hayan sufrido una cierta evaporación, que, como se sabe, tendría por efecto un desplaza-

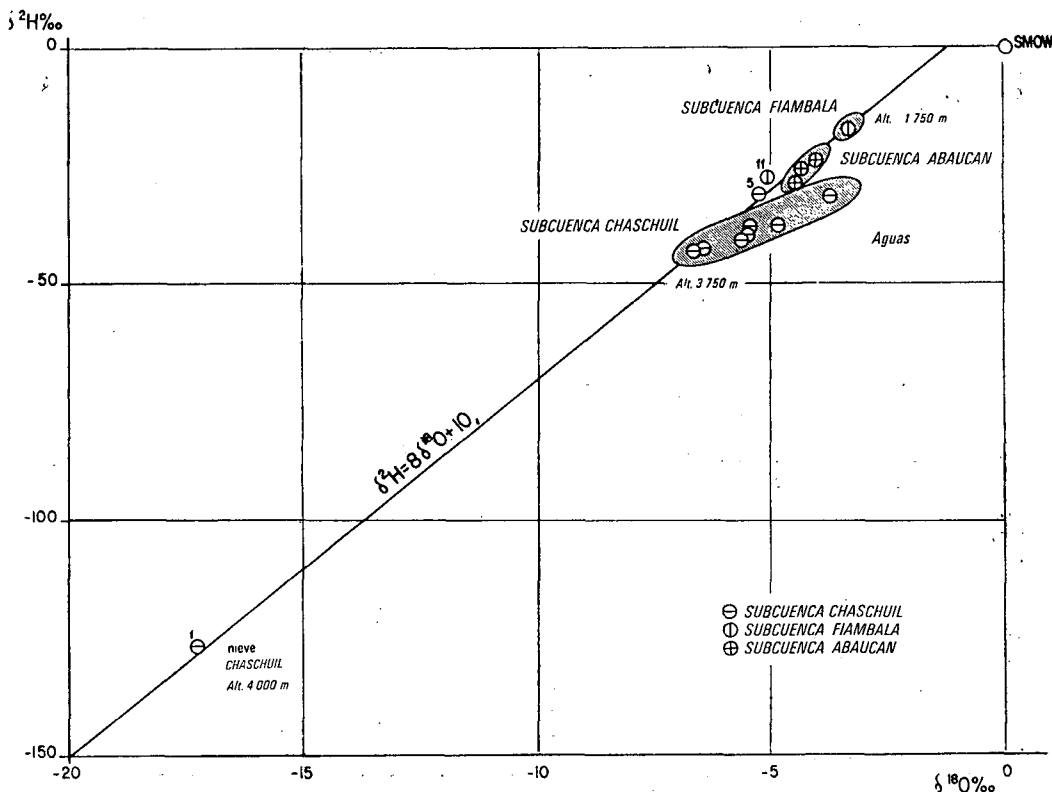


FIGURA 4: Correlaciones entre los contenidos isotópicos de deuterio y oxígeno 18 en el conjunto de la cuenca.

miento de los puntos representativos hacia la recta del diagrama⁽¹⁰⁾ y enmascararía así la existencia en las aguas de precipitación, del exceso de deuterio característico de las precipitaciones del litoral argentino. Como quiera que sea, una correlación general de pendiente 8 sugiere fuertemente que la mayor parte de estas aguas son sólo débilmente evaporadas o, incluso, no lo son en absoluto.

El interés de este hecho es evidente: el muestreo de la red de superficie es bien representativo de las aguas de los mantos libres ligados a los cursos de agua. Además, ya que estos mantos son en sí, bien representativos de las precipitaciones, se puede inferir, desde ahora, que la recarga de los mantos es rápida y está exenta de episodios de estancamiento evaporatorio en superficie.

b) Nieve

En el seno de los puntos representativos, el muestreo de nieve se singulariza por su contenido extremadamente bajo de isótopos pesados en relación a las aguas de la red hidrográ-

fica. Si se comparan las altitudes de recolección, se constata que la nieve ha sido tomada a 4.000 m, o sea, en una cota aproximadamente 300 m superior a la del punto de muestreo de agua líquida de altitud más elevada.

Esto no puede resultar solamente del gradiente isotópico en altitud ya que casi no se conocen gradientes isotópicos superiores a $-0,6\text{‰}/100\text{ m}$ en ^{18}O (o sea, $-5\text{‰}/100\text{ m}$ en ^2H), lo que podría justificar una desviación igual, como máximo a 2 ‰, en las concentraciones de ^{18}O .

Teniendo en cuenta que la diferencia entre los contenidos de ^{18}O de las muestras 1 y 3 es aquí próxima al 10 ‰, es claro que las nieves no corresponden a los mismos tipos de precipitaciones que han alimentado los cursos de agua. Estos últimos son alimentados estrictamente por las lluvias del verano austral, centradas sobre el mes de enero, como lo muestra claramente el hidrograma medio del río Abaucán (fig. 2). Durante el invierno austral, las nevadas se producen en la altitud, sin que es-

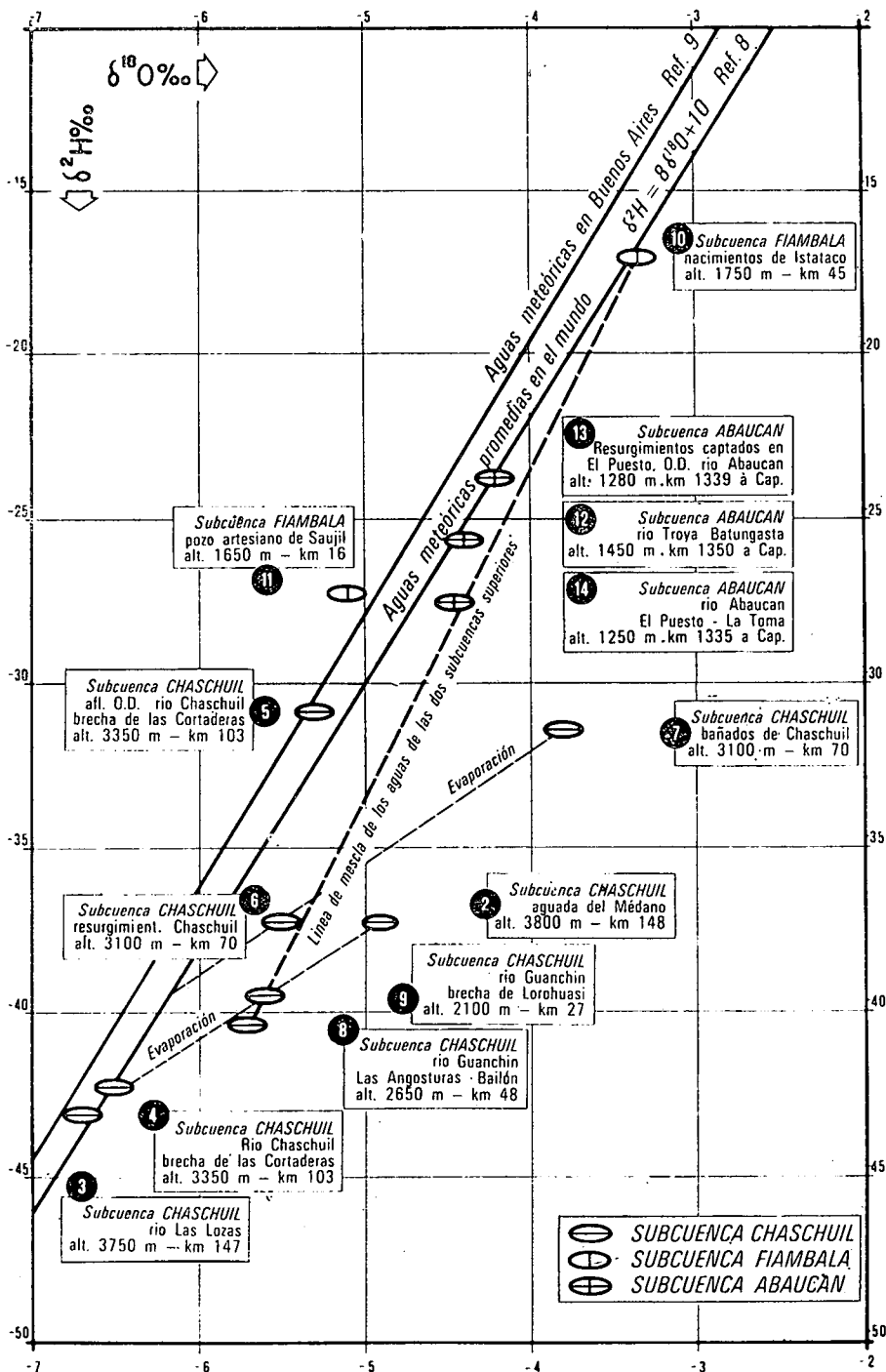


FIGURA 5: Detalle de las correlaciones entre los contenidos isotópicos de deuterio y oxígeno 18 en el conjunto de la cuenca.

tas precipitaciones correspondan a lluvias importantes en los valles. El hidrograma no se altera y permanece sensiblemente plano de abril a noviembre. Igualmente, en el contenido en ^{18}O e ^2H de los cursos de agua, no aparece ninguna participación de precipitación "isotópicamente fría". Las nieves halladas en esta región sobre la vertiente oriental de Los Andes corresponderían a la condensación de un depósito de vapor proveniente del Pacífico, que encontraría aquí el fin de su perfil de saturación sin engendrar precipitaciones líquidas en los valles.

A este propósito debe notarse que los contenidos de Deuterio de las precipitaciones invernales recolectoras en junio y julio sobre la vertiente pacífica, a una latitud comparable a la latitud de Santiago de Chile⁽¹¹⁾ enmarcan perfectamente el valor medido para la nieve argentina (fig. 7). No obstante, sería necesario disponer de indicaciones sobre los perfiles de temperatura para verificar que estas composiciones isotópicas corresponden bien a un mismo tipo de condensación.

c) *Hipótesis sobre la naturaleza y origen de la recarga.* Como quiera que sea, el agua de los ríos recolectada en período de estiaje y en la estación fría no contiene agua atribuible a la fusión estival de las nieves del invierno. En una época en que el río drena el manto, se podría esperar una participación de origen nival acumulada durante los meses de verano; por el contrario, aparece que por el río fluye agua de origen pluvial de precipitación caliente, correspondiente a una alimentación local de verano o de estación intermedia.

Sería posible atribuir un mismo origen meteorológico a todas las precipitaciones, resultando las diferencias de contenidos isotópicos de las grandes diferencias de temperatura en el momento de las condensaciones invernales (nieve) y estivales (lluvia). En este caso todas las precipitaciones tendrían un origen pacífico. Sin embargo, dado que las precipitaciones de origen pacífico estival son ya raras a esta latitud sobre la vertiente chilena, es más probable que las aguas pluviales de la red de superficie de la vertiente argentina tengan el origen atlántico que sugería un exceso de deuterio.

Las consecuencias son importantes para el estudio y la evaluación de los recursos acuíferos de la región: el manto libre que es drenado por el río, tiene una alimentación estrictamente local y pluvial, es decir, fácil de evaluar mediante un estudio pluviométrico de extensión relativamente limitada. La nieve no juega ningún papel en la alimentación del agua subterránea, contrariamente a lo que parece producirse más al sur, donde el río Mendoza, por ejemplo,

muestra un contenido de ^{18}O muy débil: de -16 a -17 ‰⁽¹²⁾ que puede interpretarse como resultante de una alimentación pluvio-nival.

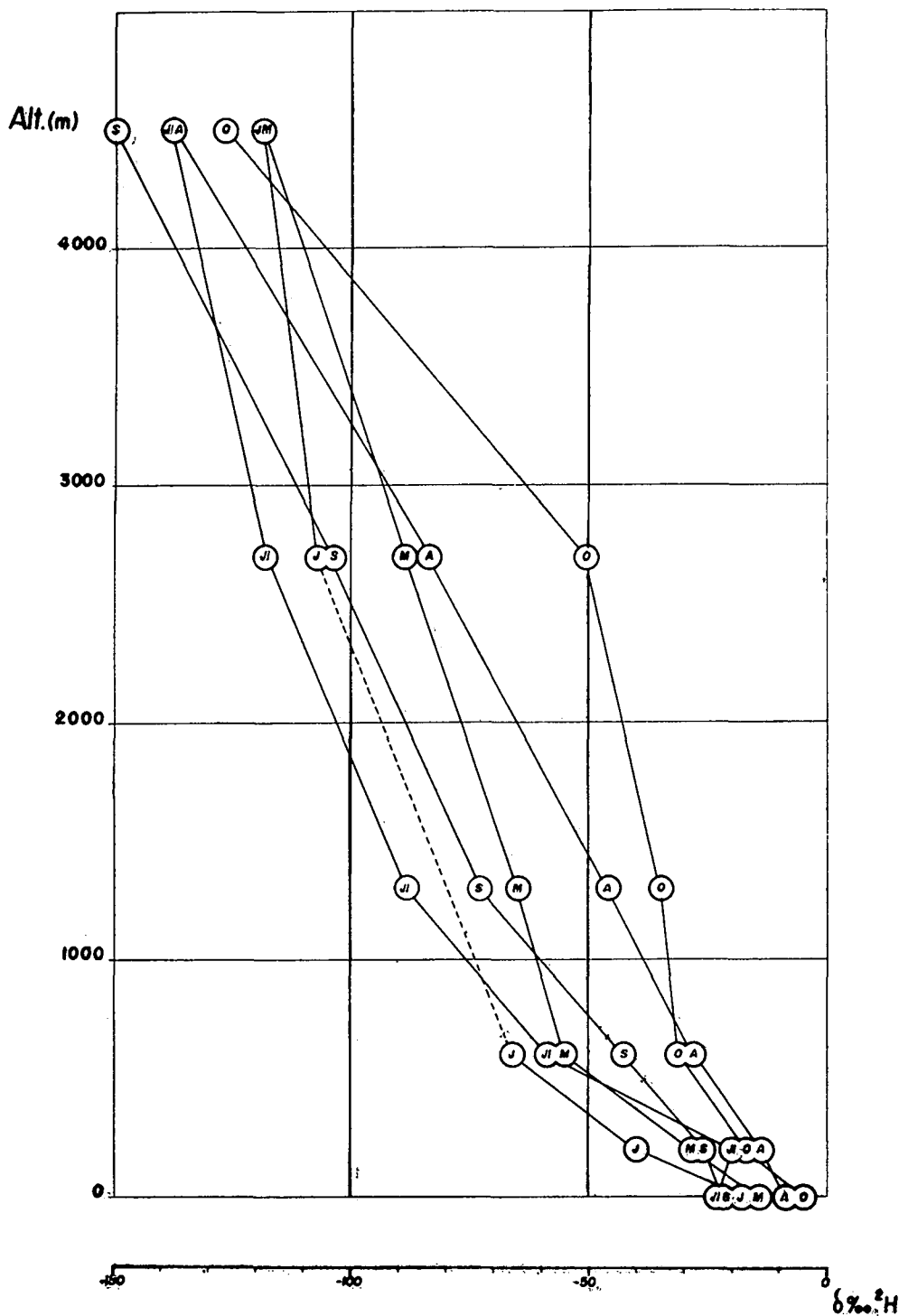
EL VALLE DEL CHASCHUIL (MUESTRAS 1 A 9)

a) *Gradientes isotópicos y evolución de los contenidos isotópicos en el curso de agua*

La alimentación pluvial de las aguas subsuperficiales drenadas por el río Chaschuil es confirmada por las variaciones de los contenidos de isótopos pesados, en función de la cota, observados a todo lo largo del curso: $\delta^{18}\text{O} = 6,7$ a 3.740 m (muest. N° 3); $-5,3$ para un tributario de la margen derecha al nivel del confluente a 3.350 m (muest. 5). El desnivel de 400 m corresponde aquí a una variación de $1,4$ ‰ del total, o sea, un gradiente aparente de $-0,35$ ‰/100 m, ciertamente bastante cercano al gradiente real de variación de las precipitaciones.

Está claro sin embargo, que una integración de los aportes sucesivos en función de la altitud debía producirse a lo largo del curso y "amortiguar" las variaciones de composición isotópica de las precipitaciones como lo sugiere el diagrama de la figura 7, donde se pueden comparar las variaciones de contenidos isotópicos a lo largo del curso con los gradientes isotópicos en altitud observados durante el invierno austral en las aguas meteorológicas de Chile⁽¹¹⁾. Sin embargo, en la figura 6 se puede ver que las precipitaciones de otoño, y sobre todo de primavera (octubre), sobre la vertiente chilena muestran gradientes isotópicas en altitud netamente más débiles que los de invierno y que serían comparables a los valores de las muestras tomadas en verano en los torrentes argentinos.

Se debe notar que esta similitud no implica que las aguas tomadas en los cursos de agua puedan ser atribuidas a las precipitaciones primaverales que vienen del Pacífico. En efecto, las precipitaciones chilenas del mes de octubre presentan, a los 3.000 m aproximadamente, una variación brutal del gradiente isotópico en altitud que no se observa en las partes altas de los ríos argentinos (fig. 7). Por otra parte, la ausencia de indicaciones sobre los contenidos de ^{18}O de las precipitaciones chilenas no permite excluir un efecto de evaporación sobre las muestras de octubre, provenientes de las estaciones situadas entre 1.000 y 3.000 m de la figura 6. Un efecto tal tendría como consecuencia una atenuación del gradiente aparente. Teniendo en cuenta el hidrograma es permitido excluir que las precipitaciones de primavera puedan tener una influencia cualquiera sobre el escurrimiento de julio. (período



de muestreo), mientras que la crecida ha tenido lugar en enero. Es pues forzado admitir un efecto de homogenización que se produce a partir de precipitaciones estivales calientes, cuyas muestras líquidas, recolectadas a 4.000 m aproximadamente y por lo tanto no mezcladas a otras aguas (como se ha visto, el aporte nival es excluido) atestiguan fuertes contenidos de isótopos pesados (muestra N° 3, figuras 4, 5 y 7).

Sin embargo, la mezcla de los aportes sucesivos a lo largo del curso no es constante. Se puede ver en las débiles variaciones obtenidas entre las muestras 3 y 4, tomadas en el mismo río a 44 Km de distancia, con un desnivel de 400 m, que este trayecto no corresponde a una zona de aporte importante. En esta zona, en efecto, el lecho del río, se encaja en la roca, cuya porosidad es débil o nula y ningún manto alimenta al río. Asimismo, la composición isotópica de las aguas del curso principal entre los puntos de muestreo 4 y 8 distantes de 55 Km y separados por un desnivel de 700 m es influenciada solo bastante débilmente por los aportes de una cuenca vertiente, sin embargo importante y cuyos contenidos de isótopos pesados son representativos de una altitud de recolección netamente más baja (muestra 6).

b) *Efectos de la evaporación*

Por otra parte, otro factor, la evaporación, puede dar cuenta de ciertas variaciones de composición isotópica. Así, es difícil discutir los efectos de la mezcla de los diferentes aportes escalonados en altitud en el punto más bajo muestreado sobre el curso, en el vado de Loro-huasi (muestra 9). Aquí, en efecto, el agua del río se inscribe bajo la recta de las apreciaciones en el diagrama ^2H , ^{18}O y revela pues que una cierta evaporación se ha ejercido sobre la reserva líquida. Ocurre lo mismo para la estación vecina inmediata aguas arriba en las Angosturas (muestra 8). Esta evaporación aparece más netamente sobre los contenidos de isótopos pesados de los aportes que provienen de las resurgencias (muestras 2 y 7), lo que muestra así que las aguas han pasado por un período de retención superficial previo y que se trata bien de resurgencias y no exsurgen-cias.

A través de una represa morrénica, las aguas de los Nacimientos del Médano (muestra 2) provienen muy ciertamente del río Las Peladas, que drena los pantanos de San Francisco. Dado que la cota media del impluvium correspondiente, a la precisión de los mapas topográficos disponibles, parece ser cercana a la de la cuenca vertiente contigua al río Las Lozas, se puede considerar que la composición isotópica del agua antes de la evaporación, estaba pró-

xima a la de la muestra 3 tomada en el torrente de Las Lozas. El mecanismo de evaporación es descrito en este caso por la recta 3-2 en la figura 5. La muestra tomada aguas abajo, en el vado de Las Cortaderas (muestra 4) es una mezcla de estos tipos de agua, a la cual se suman las aguas del tributario situado inmediatamente aguas abajo del río del Cazadero (río Tamberias). La composición isotópica de la muestra media, que aparece muy cercana a la del río Las Lozas, denota la débil contribución de las aguas evaporadas de la resurgencia Aguada del Médano (muestra 2) y la similitud de contenido de isótopos pesados de las aguas de las otras dos cuencas, que refleja aun aquí una altitud media de recolección verdaderamente muy cercana a la de las zonas que alimentan los ríos de Las Peladas y las Lozas.

Más adelante, aguas abajo, el enriquecimiento en isótopos pesados debido a la evaporación está bien marcado en la resurgencia de Chaschuil (muestra 6) y en los pantanos que éste alimenta, algunas centenas de metros más adelante (muestra 7). El examen del diagrama $\delta \text{ } ^2\text{H}/\delta \text{ } ^{18}\text{O}$ muestra que las aguas de la resurgencia de Chaschuil han estado sometidas a evaporación a partir de las aguas recolectadas a una altitud más baja que las aguas precedentes, ya que la recta que une los puntos 6 y 7 intercepta la línea de las aguas meteóricas en un punto cuyas coordenadas corresponden a un agua precipitada a una temperatura media ligeramente más alta que la de las cuencas de los ríos del Cazadero, las Peladas y las Lozas, y debida probablemente a un aporte notable de la cuenca vertiente netamente menos elevada que el río de Pillahuasi.

Es conveniente insistir aquí sobre la importancia de las variaciones de composición isotópica engendradas por los fenómenos de evaporación. Las mediciones acopladas de ^2H y ^{18}O permiten distinguir las diferentes familias de agua en función de su origen y de su evolución en superficie. Así, es posible nuevamente aislar y poner en evidencia el papel de los aportes locales del río.

Aguas abajo de la cuenca, las diferencias notadas entre las muestras 8 y 9 no son significativas en ^{18}O y son débiles en deuterio. Esto está de acuerdo con las mediciones de gasto, que no han permitido caracterizar aportes notables en esta sección.

VALLE DE FIAMBALÁ (MUESTRA 10 Y 11)

Solamente fueron recolectadas dos muestras (muestra 10 y 11). Ninguna de las dos muestras tomadas atestigua una evaporación sensible. Es posible igualmente que un cierto exce-

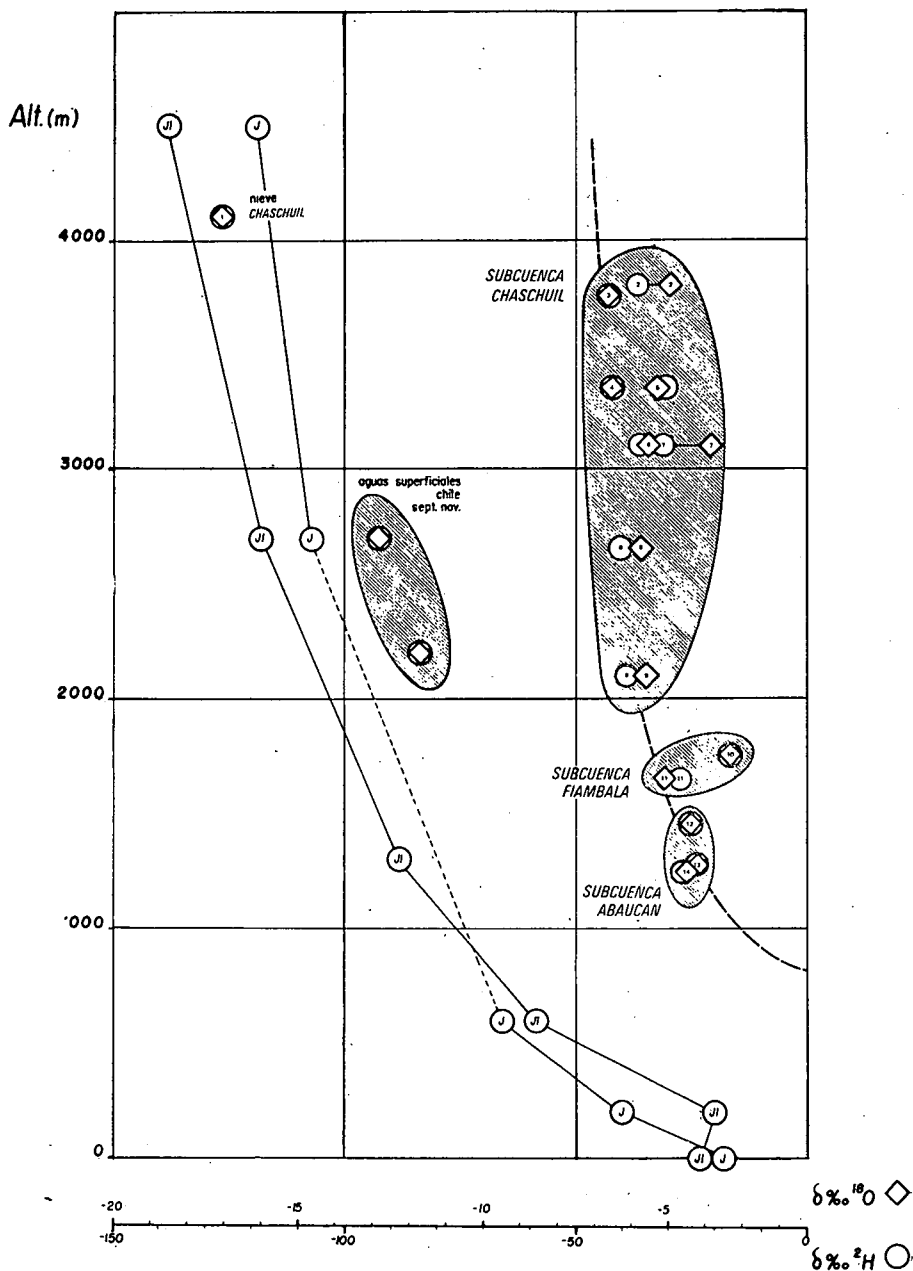


FIGURA 7: Efecto de la altitud sobre las composiciones isotópicas. Comparación de los valores observados en invierno y en primavera sobre diferentes sitios de igual latitud sobre las vertientes occidentales (Ref. 11 y 11 bis) y orientales de la Cordillera de los Andes (nuestras mediciones). N.B. Los contenidos de deuterio y oxígeno 18 han sido indicados sobre un mismo gráfico utilizando la relación

$$\delta \text{ } ^2\text{H} = 8 \delta \text{ } ^{18}\text{O} - 10 \quad [8]$$

donde las escalas de las concentraciones isotópicas han sido escogidas y dispuestas de forma tal que las parejas de valores isotópicos de toda muestra situada sobre la recta Craig-Daansgard estén confundidos. La cualidad de la superposición de los puntos representativos de los contenidos de ^{18}O (cuadrados) y de ^2H (círculos) para una muestra dada, traduce el respeto de esta relación. Esta representación original autoriza la composición de las muestras cuyo análisis ha sido hecho sobre un solo isótopo, cualquiera que sea, y permite poner en evidencia, para todas las muestras sometidas a un doble análisis, una desviación eventual de la recta media de equilibrio de los dos puntos representativos de la muestra considerada.

so de deuterio sea perceptible en la muestra 11 que proviene de una fuente artesiana situada sobre el flanco del valle. Esta agua de manantial corresponde a la muestra menos sospechosa de evaporación de toda la colección y es significativo probablemente que se inscribe en las proximidades de la recta de correlación $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ hallada para la estación de Buenos Aires (Levin *et al.*, 1973 ⁽⁹⁾). Esto reforzaría la concepción de que las aguas de las precipitaciones que han alimentado el manantial provienen de masas de vapor de origen atlántico (cf. 5.1).

Sin disponer de otras indicaciones sobre la cuenca vertiente posible de este manantial, se puede estimar, sobre la base de las informaciones discutidas a propósito del valle de Chaschuil, que las aguas aquí provienen igualmente de una alimentación local correspondiente a un impluvium más bajo que el de las subcuencas del río de las Lozas. Está pues excluido que esta agua tenga una contribución significativa de altitud elevada y la recarga de agua subterránea es por lo tanto ciertamente muy limitada.

De la misma forma, la muestra del río Fiambalá, tomada en los Nacimientos de Istataco (muestra 10) corresponde a precipitaciones de tipo caliente, es decir, de baja altitud y estación media. Se puede señalar a propósito de esto que las aguas tomadas a este nivel han sido recolectadas en gran parte sobre una vasta zona plana situada a una altitud ligeramente inferior a 2.000 m para una altitud del punto de agua de 1.750 m y $\delta^{18}\text{O} = -3.3$. Si se admite una alimentación local de la cual se compara la composición isotópica con la del río de las Lozas en un punto más alto ($\delta^{18}\text{O} = -6.7$ a 3.750 m), se obtiene un gradiente aparente cercano a 0,2 ‰/100 m. Se trata de un valor mínimo del gradiente a causa de un efecto de "amortiguamiento" en la alimentación de superficie, pero este efecto es verdaderamente bastante débil dado el valor ya verosímil del gradiente (en Italia Central han sido puestos en evidencia gradientes de 0,2 a 0,3 ‰/100 m: Zuppi *et al.*, 1974 ⁽¹³⁾). Esto tiende a mostrar que para cada intervalo de altitud, la contribución de las precipitaciones locales es mayoritaria.

EL VALLE DEL RÍO ABAUCÁN (MUESTRA 12, 13 Y 14)

Las composiciones isotópicas están bien agrupadas y su posición en el diagrama $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ muestra que no han sufrido una evaporación considerable. En particular, para la resurgencia (de tipo Foggara) situada aguas arriba de la localidad de El Puesto (muestra 13) no se

observa el fenómeno de enriquecimiento notado para las resurgencias del valle del Chaschuil (muestra 7). Esto se debe probablemente a la ausencia aquí de zonas de retención planas, parcialmente *colmatadas* y propicias a la evaporación que eran una de las trazas originales de la geografía física del valle del Chaschuil. Parece pues que la "Foggara" de El Puesto restituye, sin gran modificación el agua del río Tamberías, de composición isotópica seguramente cercana a la del río la Troya (muestra 12).

Otro hecho debe ser subrayado aquí: la composición isotópica de los ríos de la Troya y Abaucán no muestra el enriquecimiento débil, pero sin embargo neto, notado entre las aguas arriba y las aguas abajo en los valles de Chaschuil y Fiambalá y atribuido a la importancia del aporte local. Esto puede interpretarse por el agotamiento en este valle de los aportes detectados aguas arriba. Dado que el período invernal de muestreo coincide con el estiaje y por lo tanto con una alimentación debida esencialmente a la contribución de los mantos acuíferos, aparece entonces que los mantos no recargan el río en el valle del río Abaucán. Esto no parece estar de acuerdo con la naturaleza geológica del substrato, ya que el valle está instalado aquí sobre terrazas aluviales del cuaternario reciente y este tipo de material constituye generalmente buenos depósitos acuíferos.

La ausencia de aportes subterráneos aparece confirmada no obstante, por las mediciones del gasto disponibles que indican que el escurrimiento del río Abaucán corresponde a la suma de los gastos de los ríos afluentes provenientes de los valles de Chaschuil y Fiambalá.

En ausencia de datos sedimentológicos, climatológicos y sobre todo piezométricos, se pueden proponer provisoriamente dos hipótesis para tener en cuenta la esterilidad de los aluviones en esta región: las terrazas de aluviones pueden ser colmatadas eficazmente por una fracción arcillosa que ha podido depositarse en esta región situada entre 1.200 y 1.300 m de altitud sea aún demasiada baja para beneficiarse de las lluvias de verano suficientemente abundantes para alimentar extensamente los mantos, como lo han permitido poner en evidencia las composiciones isotópicas de los ríos aguas arriba a partir de 2.000 m de altitud.

Por otra parte, la recta obtenida sobre la figura 5 que une los puntos representativos de los ríos Chaschuil (o Guanchín) y Fiambalá (muestras 9 y 10), afluentes del río Abaucán, pasa próxima a los puntos representativos de este río (muestras 13 y 14); se puede considerar que el contenido de isótopos pesados del

río Abaucán resulta pues de una mezcla simple entre las aguas de sus dos tributarios en proporciones que se deducen por medición gráfica de los segmentos de recta 9-14 y 14-10 proporcionales a las masas respectivas de agua de los ríos Chaschuil y Fiambalá. Parece que las contribuciones respectivas son sensiblemente iguales. Esto está de acuerdo con las estimaciones de los servicios hidráulicos que indican que en invierno el río Abaucán tiene un gasto de aproximadamente $2 \text{ m}^3/\text{seg}$, lo que deja aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{seg}$ para el aporte del río Fiambalá.

Discusión de los resultados de la medición del tritio

NIVEL DE LOS CONTENIDOS DE TRITIO EN LAS PRECIPITACIONES

En la fecha de los muestreos (20 y 21 de julio de 1972); los contenidos más elevados observados no alcanzaban una treintena de unidades de tritio (U.T.) Nieve: $23 \pm 4 \text{ U.T.}$, surgencia aguada del Médano: $26 \pm 4 \text{ U.T.}$, río Las Lozas: $32 \pm 4 \text{ U.T.}$.

La muestra de nieve constituye la única señal cronológica cierta, ya que esta muestra no puede provenir de precipitaciones anteriores a junio de 1972 (cf. 4.2). En ausencia de otras observaciones sobre la evolución de los contenidos de Tritio de las precipitaciones a escala regional e incluso nacional, se pueden comparar simplemente los contenidos máximos indicados en la literatura para América del Sur bajo estas latitudes⁽¹⁴⁾. Resulta de esto que los contenidos de las precipitaciones han sido siempre inferiores a los contenidos registrados en el momento de los muestreos.

CONTENIDOS DE TRITIO EN LAS DIFERENTES SUBCUENCAS

Si los contenidos de tritio están ligados a los "tiempos de residencia" de las aguas en los niveles subsuperficiales, se debe registrar una disminución de dichos contenidos en las aguas susceptibles de haber completado recorridos subterráneos de larga duración. Se observa, en efecto, $3 \pm 2 \text{ U.T.}$ y $6 \pm 2 \text{ U.T.}$ en las resurgencias de Chaschuil (muestra 6) y en el pozo de Saujil (muestra 11).

Por el contrario, los contenidos observados en las resurgencias Nacimientos de Istataco ($16 \pm 3 \text{ U.T.}$) y en el río Abaucán a la salida de un tránsito subterráneo en la "pileta" aluvial de Fiambalá (igualmente $16 \pm 3 \text{ U.T.}$)

no se distinguen sensiblemente de los contenidos de tritio en las aguas superficiales de los aportes tales como el río Guanchín (al nivel de Las Angosturas): $15 \pm 3 \text{ U.T.}$; y el río La Troya: $12 \pm 3 \text{ U.T.}$; excluyendo así los tiempos de tránsito subterráneo de larga duración.

Se advertirá que los contenidos de tritio observados en las aguas del río Guanchín al nivel de Las Angosturas son perfectamente compatibles con los de las aguas de sus principales tributarios (río Nacimientos después de la confluencia de Aguada del Médano ($26 \pm 4 \text{ U.T.}$) y del río Las Lozas ($32 \pm 4 \text{ U.T.}$) y resurgencias de Chaschuil ($3 \pm 2 \text{ U.T.}$).

Conclusiones

Si bien aquí se trata de presentar sólo los resultados de un reconocimiento, se puede, sobre la base del estudio isotópico, proponer varias conclusiones relativas a la hidrología de la región.

—las aguas superficiales tomadas en el invierno austral corresponden a precipitaciones locales de estación caliente.

—La evaporación es legible en las variaciones de los contenidos de isótopos pesados de ciertas muestras de resurgencias que han estado sometidas, pues, a un estado de retención superficial, mientras que otras están exentas de este, lo que está en relación con las variaciones de porosidad de las zonas de infiltración.

—La nieve que se encuentra por encima de 4.000 m presenta un "trazado" natural que la relaciona con una precipitación de origen pacífico invernal.

—A la diferencia de las lluvias estivales que alimentan los mantos superficiales, la nieve no participa en la recarga.

—Las lluvias eficaces para la recarga de los mantos se producen en estación caliente entre 1.500 y 4.000 m aproximadamente, a partir de depresiones atlánticas. Por encima se encuentra nieve invernal de origen pacífico. Por debajo de 1.500 m la saturación de la atmósfera se alcanza más raramente.

—Los contenidos de isótopos pesados permiten en ciertos casos, reconstruir en forma semi-cuantitativa las mezclas entre las aguas de origen y evolución diversas.

Todos estos resultados están a favor de la existencia, en esta región, de reservas de agua subterránea extremadamente limitadas, directamente estimables sobre la base de un estudio comparado de las "isoyetas" y los contenidos de isótopos estables.

Resumen

La cuenca superior del río Abaucán drena lo esencial de los recursos acuíferos de una región seca y desértica.

El presente estudio isotópico, emprendido en el marco de una colaboración recíproca entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina, y el Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), Francia, a petición de la administración regional, tiene como objetivo precisar las modalidades del tránsito del agua.

Las informaciones suministradas por la medición de concentraciones isotópicas de deuterio y Oxígeno 18 y, más accesoriamente, de tritio, han revelado la ausencia de la contribución de las precipitaciones nivales a la alimentación de los mantos acuíferos y sólo han acordado una débil importancia a los acuíferos susceptibles de ocupar los depósitos aluviales interesados por los tránsitos subterráneos.

Estos resultados, obtenidos con relativamente pocos análisis, indican que este tipo de investigación podría ser desarrollada sistemáticamente en la mayor parte de las cuencas hidrográficas andinas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al doctor Renato Radicella, Gerente de Radioisótopos y Radiaciones de la Comisión Nacional de la Energía Atómica, el estímulo brindado durante la ejecución de este trabajo, al ingeniero Eduardo Gallo de la Dirección Provincial del Agua de Catamarca, quien nos ha guiado y ayudado en la recolección de muestras y a la señora Lilliane Merilvat del Servicio de Isótopos Estables del Centro de Estudios Nucleares de Saclay, Francia, quien se ha encargado de los análisis de deuterio.

NOTA

1. Para más detalles: hoja 2.769 del Instituto Geográfico Militar con la casi totalidad de la región, u hojas 12c, 13b y 13c de la "Base topográfica para el mapa geológico-económico de la R. Argentina" ed. Direc. Nac. de Geología y Minería, que solo cubre parte de la zona estudiada.

REFERENCIAS

- (1) Evaluación de los recursos naturales de la Argentina, Tomo IV; Recursos Hídricos superficiales, Volumen 2, cap. 30, p. 605-624. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires (1962).
- (2) Los Recursos Hidráulicos de Argentina, Comisión Económica para la América Latina, Tomo 2. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires (1969).
- (3) TURNER, JUAN CARLOS M.: Descripción geológica de la hoja 13 b, Chaschuil. Boletín N° 106. Dirección Nacional de Geología y Minería. Buenos Aires, 78 p. 12 Pl. 1 carta (1967).
- (4) BONORINO, FÉLIX GONZÁLEZ: Descripción geológica de la hoja 13 C, Fiambalá, Boletín N° 127, Dirección Nacional de Geología y Minería, Buenos Aires, 11 pl., 2 cartas (1972).
- (5) BARÓ, G. B. y GÓMEZ, H. R.: Informe preliminar sobre la determinación de posibles interconexiones entre aguas superficiales y alumbraamientos o surgencias en las subcuencas Guanchín y Aguas Negras. Comisión Nacional de Energía Atómica, División Aplicaciones, 15 p., 4 tablas, 2 figs., Buenos Aires (1968).
- (6) MOLINARI, J.: Les Traceurs Isotopiques en Hydrologie. Annales des Mines, Paris, pag. 13-38, octubre (1969).
- (7) — : Note sur l'étude hydrodynamique de la nappe alluviale du bassin de Fiambalá (province de Catamarca). Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre d'Études Nucléaires de Grenoble, Dr. Sar - Cr/Int/69-226, 9 pag., diciembre (1969).
- (8) CRAIG, H.: Isotopic variations in meteoritic waters. Science, 133, 1702-1703 (1961).
- (9) LEVIN, M.; CORTELEZZI, C. R.; FIGGINI, A. J.: Uso de isótopos estables (Deuterio y Oxígeno 18) para determinación del origen de la salinización del "Fuechense" en la ciudad de La Plata y alrededores (primera parte). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino. CONI. Tomo 1, p. 373-393, Buenos Aires (1973).
- (10) FONTES, J. CH. ET GONZALEZ, R.: Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 3, N° 3, 258-266, Décembre (1967).
- (11) MOSER, H.; NEUMAIER, F. y Col. Jahresbericht für Strahlen und Umweltforschung mbH. GSF Bericht R53, p. 89-94. München (1973).
- (12) LERMAN, J. C.: Agua subterránea en Bahía Blanca: Investigación con isótopos. *Ciencia e Investigación*, t. 24, N° 7 (1968).
- (13) ZUPPI, G. M.; FONTES, J. CH. y LETOLLE, R.: Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfures dans le Latium en Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, AIEA, p. 341-361, Vienne (1974).
- (14) AIEA: Environmental isotope data, N° 1, 2, 3, 4. Vienne, Techn. reports N° 96, 117, 129, 147 (1969-70-71-72-73).